УДК 621.039.524

ИЗМЕНЕНИЕ ОТРАВЛЕНИЯ УСЛОВНОГО ТЕПЛОВОГО РЕАКТОРА САМАРИЕМ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

И.Б. Валуев, Р.П. Горлов, А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет
Тел.: (382-2)-415-609

В работе с позиции точечной модели обсуждается отравление самарием теплового реактора. Рассматриваются режим выхода свежего реактора на заданную мощность и переходные режимы с мощности на мощность после достижения равновесного отравления. Сформулированы основные принципы определения различных характеристик указанных процессов и приведены их графические решения и расчетные соотношения.

Введение

Отравление самарием, одним из продуктов деления, имеющим большое “паразитное” поглощение тепловых нейтронов, относится к важным вопросам общей теории ядерных реакторов. Наиболее подробно он излагается в специальной литературе, посвященной физике переходных процессов и физическим основам эксплуатации. Несмотря на это, в решении практических задач по нестационарному отравлению ^{149}Sm в некоторых переходных режимах отсутствует необходимая конкретная информация. Кроме того, появились новые экспериментальные данные и подходы в оценке отравления, которые необходимо принимать во внимание. Несомненно, что любое уточнение будет способствовать повышению безопасности эксплуатации ядерных установок.

Краткий обзор работ, проведенный в работе [1], показал, что нестационарное отравление (или шлакование) самарием не рассматривалось столь же подробно как отравление ксеноном и касалось в основном режимов пуска свежего реактора и останова со стационарного уровня мощности. Поскольку уровень обоих эффектов отравления на переходных процессах может оказаться соизмеримым, для оператора реакторной установки желательно иметь поддержку в виде графиков, раскрывающих с достаточной полнотой, как, например, в случае с ксеноном, особенности и других переходных режимов. Представление решений в виде графиков зачастую оказывается весьма удобным не только для определения качественного характера процесса, но и для проведения количественной оценки с приемлемой точностью в практических задачах. Эти соображения и предопределили проведение данной работы.

Поскольку любой тепловой реактор обладает своими присущими ему одному физическими свойствами, в качестве показательного взят условный тепловой реактор (УТР) [2], данные для которого приведены в табл.

Концентрация самария на данный момент $N_{Sm}(t)$ определяет долю паразитного поглощения нейтронов в реакторе. Для физически большого реактора с малой долей утечек тепловых и быстрых нейтронов потеря реактивности за счет отравления самарием, как для гомогенного, так и для гетерогенного реактора, может быть оценена по формуле [3]

$$\rho_{Sm}(t) = -\theta q_{Sm}(t) = -\theta \frac{\sigma_{Sm} N_{Sm}(t)}{\sigma_{a5} N_5},$$

где θ – коэффициент использования тепловых нейтронов; $q_{Sm}(t)$ – отравление самарием на текущий момент времени; σ_{Sm}, σ_{a5} – эффективные микроскопические сечения поглощения ^{149}Sm и ^{235}U, см², N_5 – ядерная концентрация ^{235}U, ядер/см³.

Расчетные формулы для определения динамики отравления самарием в различных режимах выразим через эффективные периоды полувыгорания прометия T^*_{Pm} и самария T^*_{Sm} в сутках, которые в соответствии с физическими данными УТР (см. табл.) могут быть представлены в виде

$$T^{\bullet}_{Pm} = \frac{\ln 2}{\lambda^*_{Pm}} = \frac{\ln 2}{\lambda_{Pm} + \sigma_{Pm}\Phi_2} \approx \frac{\ln 2}{\lambda_{Pm}} \approx 2,23,$$

Таблица. Исходные данные к расчету отравления $^{149}_{62}Sm$ УТР [2]

Параметр	Условное обозначение	Единица измерения	Значение для УТР
Номинальная мощность	N	МВт	80
Средняя плотность потока нейтронов на номинальной мощности	$\Phi_{ном}$	$\frac{нейтрон}{см^2 c}$	$4\cdot10^{11}$
Постоянная распада прометия	λ_{Pm}	c^{-1}	$3,57\cdot10^{-6}$
Период полураспада прометия	T_{Pm}	сут	2,228
Эффективный период полувыгорания самария на номинальной мощности	T'_{Sm}	сут	4
Эффективное микросечение поглощения $^{149}_{62}Sm$	σ_{Sm}	$см^2$	$5\cdot10^{-20}$
Эффективное микросечение поглощения $^{149}_{61}Pm$	σ_{Pm}	$см^2$	$1,4\cdot10^{-21}$
Уменьшение реактивности из-за стационарного отравления самарием	$\rho_{Sm,0}$	%	-0,70
Максимальная глубина прометиевого провала при останове реактора с номинальной мощности	$\rho_{ПП}$	%	-0,5
Комплекс, характеризующий активную зону	$\theta\cdot\Sigma_f/\Sigma_a$	–	0,856

$$T^*_{Sm} = \frac{\ln 2}{\lambda^*_{Pm}} = \frac{\ln 2}{\sigma_{Sm}\Phi_2} \approx \frac{16\cdot10^{13}}{\Phi_2} = \frac{400}{N_2},$$

где Φ_2 – плотность потока нейтронов в реакторе, [нейтрон/(см^2·с)], соотв...вующая мощности, на которой работает реактор N_2, %.

Покажем получение основных расчетных формул и графиков для различных режимов работы УТР.

1. Режим выхода свежего реактора на мощность N_2

В этом режиме потеря реактивности реакт... на текущий момент за счет отравления самарием $\rho_{Sm}(t)$ будет определяться выражением

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{Sm,0}\left[\begin{array}{l} 1+\dfrac{T_{Pm}}{T^*_{Sm}-T_{Pm}}\exp\left(-\dfrac{\ln 2\cdot t}{T_{Pm}}\right)- \\ -\dfrac{T^*_{Sm}}{T^*_{Sm}-T_{Pm}}\exp\left(-\dfrac{\ln 2\cdot t}{T^*_{Sm}}\right)\end{array}\right].$$

Равновесное отравление самарием не зависит от мощности реактора и равно

$$\rho_{Sm,0} = -\theta\cdot\gamma_{Pm}\frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}}, \quad (1)$$

где γ_{Pm} – удельный выход прометия; σ_{f5} – микроскопическое сечение деления U^{235}.

Зависимости изменения ρ при установлении стационарного отравления (1) для УТР со свежей начальной загрузкой топлива и различных уровней мощности представлены на рис. 1.

Время установления равновесной концентрации $t_{уст}$ в сутках при работе свежего реактора на различных уровнях мощности можно найти из условия достижения уровня в 97 % от равновесного, что дает следующее трансцендентное уравнение

$$\frac{\rho_{Sm}(t)}{\rho_{Sm,0}} = 0,97 = 1+\frac{T_{Pm}}{T^*_{Sm}-T_{Pm}}\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot t_{уст}}{T_{Pm}}\right)-$$

$$-\frac{T^*_{Sm}}{T^*_{Sm}-T_{Pm}}\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot t_{уст}}{T^*_{Sm}}\right).$$

Решение этого ...нения представлено на рис. 2 в виде зависимости $t_{уст}$ от мощности реактора N_2, и с погрешност... <0,2 % аппроксимируется уравнением

$$t_{уст} = \frac{2024}{N_2} + 3 + 0,016\cdot N_2.$$

Можно построить зависимость отравления от эффективного времени τ; в этом случае эффективное время установления стационарного отравления будет определяться в эффективных сутках по формуле

$$\tau_{уст} = \frac{t_{уст}\cdot N_2}{100} = 20,24 + \frac{3\cdot N_2}{100} + \frac{0,016\cdot N_2^2}{100}. \quad (2)$$

Таким образом, продолжительность достижения 97 % от равновесной концентрации самария при работе на номинальной мощности для УТР составит ≈25 суток.

2. Переходные режимы после достижения равновесного отравления самарием

В этом случае любой по направлению переход с N_1 на N_2 вызовет отклонение реактивности $\Delta\rho_{Sm} = \rho_{Sm,0} - \rho_{Sm}(t)$, закон изменения, которого будет определяться уравнением

$$\Delta\rho_{Sm}(t) = \Delta\rho_{ПП}\frac{T^*_{Sm}}{T^*_{Sm}-T_{Pm}}\times$$

$$\times\left[\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot t}{T_{Pm}}\right)-\exp\left(-\frac{\ln 2\cdot t}{T^*_{Sm}}\right)\right],$$

где $\Delta\rho_{ПП} = \rho_{ПП}(N_1) - \rho_{ПП}(N_2)$ означает разность в глубинах прометиевых провалов при останове с соответствующей мощности. Глубина прометиевого провала определяется прямо пропорциональной зависимостью от плотности потока нейтронов Φ в реакторе [2]

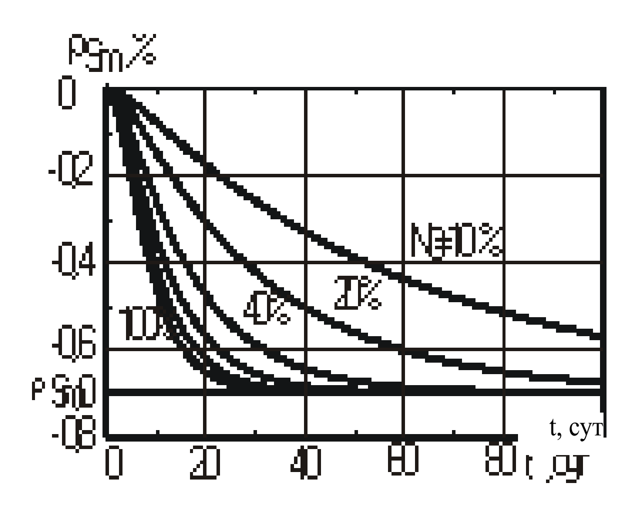


Рис. 1. Установление равновесного отравления самарием при работе УТР на различных уровнях мощности [2]

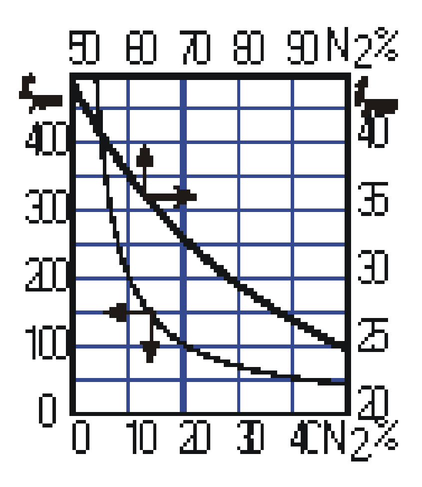


Рис. 2. Зависимость времени установления равновесного отравления от мощности УТР, ур. (2)

$$\rho_{\Pi\Pi} = -\theta \cdot \gamma_{Pm} \frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}} \frac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} \Phi =$$

$$= \rho_{Sm,0} \frac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Pm}} \Phi = \rho_{Sm,0} \sigma_{Sm} \frac{T_{Pm}}{\ln 2} \Phi, \qquad (3)$$

т.е. зависит от мощности реактора и может быть определена в виде

$$\rho_{\Pi\Pi}(N) = \rho_{\Pi\Pi}(N_{HOM}) \cdot N / N_{HOM}.$$

Величина прометиевого провала при останове УТР с номинальной мощности, принятая в [2], несколько отличается от результата, “согласованного по ксенону” [1] в соответствии с табл.:

$$\rho_{\Pi\Pi}(N_{HOM}) \approx -0{,}39\,\%.$$

С учетом последнего замечания получим из (3) следующие уравнения динамики отравления самарием на этих переходных режимах в зависимости от мощности реактора

$$\Delta\rho_{Sm}(t) = \frac{1{,}56 \cdot (N_1 - N_2)}{400 - 2{,}23 \cdot N_2} \times$$

$$\times \left[\exp(-0{,}311 \cdot t) - \exp(-0{,}00173 \cdot N_2 \cdot t) \right],$$

$$\Delta\rho_{Sm}(\tau) = \frac{1{,}56 \cdot (N_1 - N_2)}{400 - 2{,}23 \cdot N_2} \times$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{31{,}1 \cdot \tau}{N_2} \right) - \exp(-0{,}173 \cdot \tau) \right],$$

где t – время в сутках, и τ – время в эффективных сутках. Графики переходных режимов, построенных по уравнениям (4) или (5), представлены на рис. 3, 4.

Можно видеть, что основной особенностью этих режимов является наличие экстремумов, координаты которых определяются из уравнений

$$t_{max} = \frac{T_{Pm} \cdot T^*_{Sm}}{\ln 2 \left(T_{Pm} - T^*_{Sm} \right)} \ln \frac{T_{Pm}}{T^*_{Sm}}, \qquad (4)$$

$$\Delta\rho^{max}_{Sm} = \Delta\rho \frac{T^*_{Sm}}{T^*_{Sm} - T_{Pm}} \times$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t_{max}}{T_{Pm}} \right) - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t_{max}}{T^*_{Sm}} \right) \right]. \qquad (5)$$

Те же характеристики, но уже в зависимости от мощности УТР примут вид

$$t_{max} \approx \frac{1286}{2{,}23 \cdot N_2 - 400} \cdot \ln \frac{N_2}{179{,}5},$$

$$\Delta\rho^{max}_{Sm} \approx \frac{1{,}56 \cdot (N_1 - N_2)}{400 - 2{,}23 \cdot N_2} \times$$

$$\times \left[\exp(-0{,}311 \cdot t_{max}) - \exp(-0{,}00173 \cdot N_2 \cdot t_{max}) \right].$$

Следует заметить, что время наступления максимального отклонения реактивности от равновесного значения t_{max} зависит только от значения мощности, на которую сделан переход, т.е. от мощности N_2. В то же время максимум отклонения реактивности от равновесного значения $\Delta\rho^{max}_{Sm}$ будет зависеть и от исходной мощности N_1. Графики зависимостей t_{max} и $\Delta\rho^{max}_{Sm}$ при переходе с мощности N_1 на N_2 (6) и (7) представлены на рис. 5.

В данном режиме время выхода на равновесное значение отравления самарием t_{ex} будет определяться

$$-\Delta\rho_{\Pi\Pi} \frac{T^*_{Sm}}{T^*_{Sm} - T_{Pm}} \times$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t_{ex}}{T_{Pm}} \right) - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t_{ex}}{T^*_{Sm}} \right) \right]_{t > t_{max}} = 0{,}03.$$

Графики решения уравнения (8) можно видеть на рис. 6.

Заключение

Поскольку в рассматриваемых процессах достижение равновесных значений отравления достигается

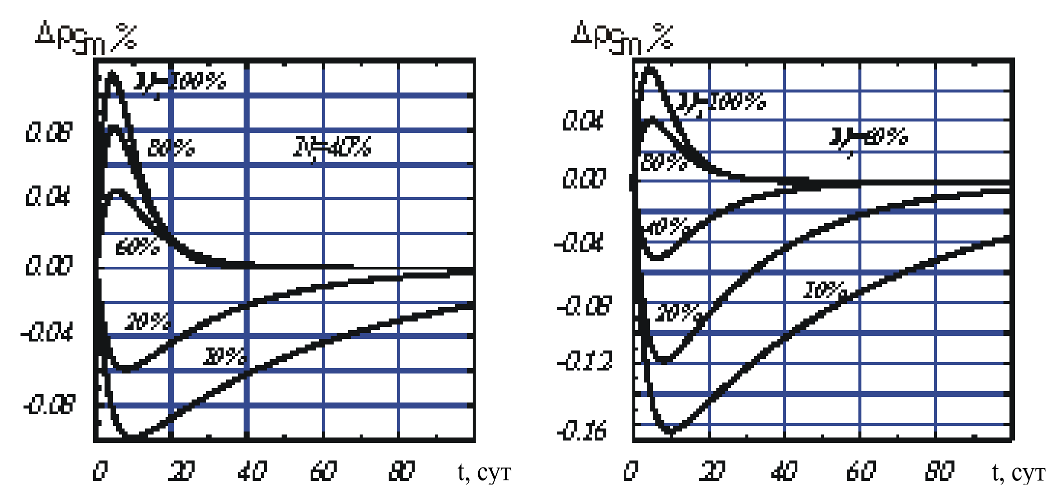


Рис. 3. Графики изменения реактивности в переходных режимах в зависимости от времени

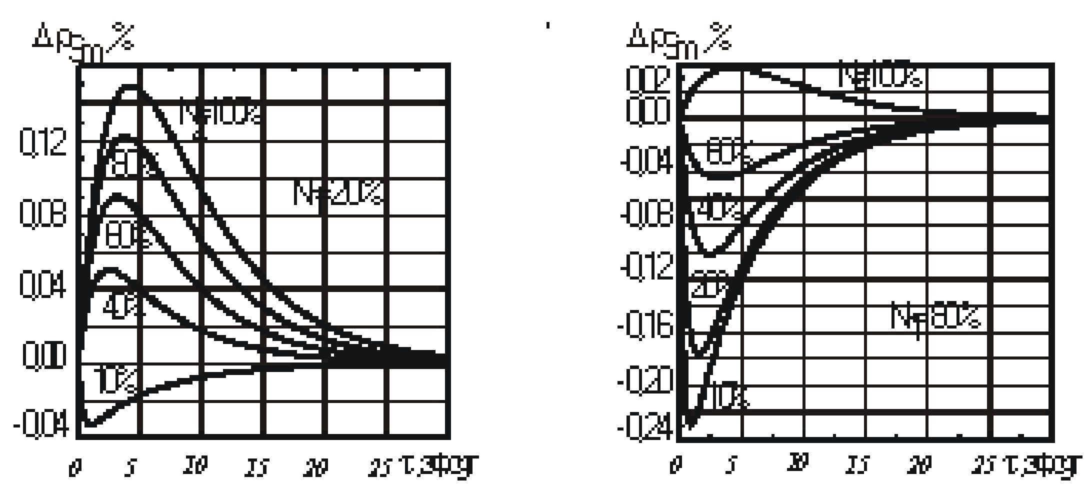


Рис. 4. Изменение реактивности в переходных режимах в зависимости от эффективного времени

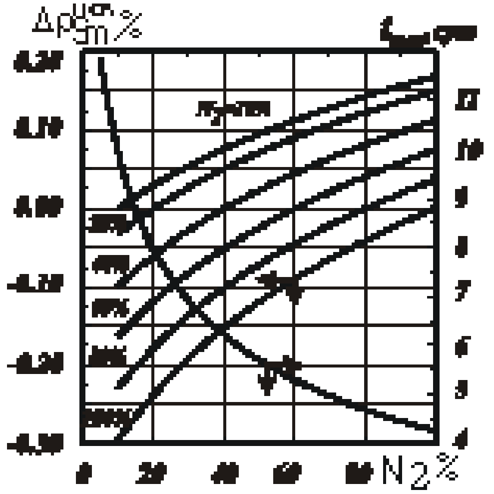


Рис. 5. График параметров экстремума при переходе с мощности N_1 на мощность N_2

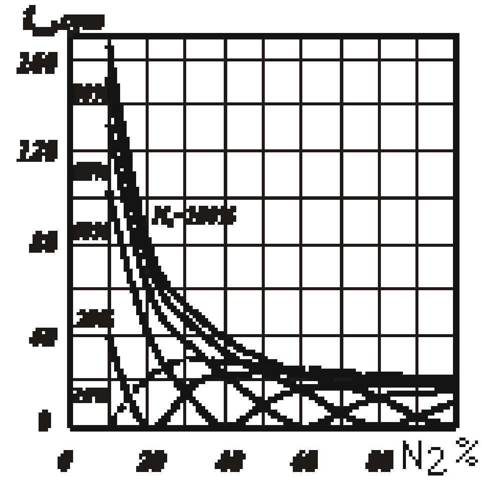


Рис. 6. Время выхода на равновесное значение отравления при переходе с мощности N_1 на мощность N_2

при $t \to \infty$, был предложен принцип достаточного с практической точки зрения ограничения процесса временем достижения значений, отличающихся от равновесных на 3 %.

Это позволило либо впервые получить, либо уточнить графические и аналитические зависимости основных характеристик:

– для первого режима – оценки времени установления ра$\tau_{[illegible]}$вес $\tau_{уст}$ отравления в разных единицах времени и ;

– для второго – параметры отклонения $\Delta\rho_{Sm}^{max}$, t_{max} и время вы$\tau_{\varepsilon\xi}$хода на равновесное значение отравления по самарию .

Предложенные серии графических решений позволяют быстро оценить необходимые характеристики отравления самарием в указанных переходных режимах, а также использовать эти решения в графическом методе расчета нестационарного отравления самарием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлов П.Р., Кузьмин А.В. Основные особенности отравления самарием. Томск. политехн. ун-т. – Томск, 1999. – 16 с.: ил. – Библиогр.: 12 назв. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 30.07.99, № 2518 – В99.
2. Владимиров В.И. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с., ил.
3. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физика переходных процессов в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с., ил.
4. Горлов П.Р., Кузьмин А.В. К расчету переходных режимов после достижения равновесного отравления самарием // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – С. 145–147.
5. Валуев И.Б., Горлов П.Р., Кузьмин А.В. Графики переходных режимов после достижения равновесного отравления самарием // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – С. 157–159.